

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Silver Põlgaste

**Aerosoolide mõju pilvedele MODIS ja SEVIRI
satelliitinstrumentide andmete põhjal**

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Füüsika eriala

Juhendaja:
Velle Toll, PhD

Tartu 2020

Aerosoolide mõju pilvedele MODIS ja SEVIRI satelliitinstrumentide andmete põhjal

Inimtekkeliste aerosoolide mõju Maa kiirgusbilansile pilvede omaduste mõjutamise kaudu on võrreldes teiste antropogeensete kliimat mõjutavate teguritega ebatäpselt määratletud. Suure tõenäosusega on inimtekkeliste aerosoolide mõju pilvedele kokkuvõttes kliimat jahutav, aga hiljuti on leitud, et see jahutavmõju ei ole nii suur, kui varem arvati. MODIS satelliitinstrument on varasemates pilvede omadusi käsitlevates uuringutes tihti kasutust leidnud, aga seadmel on ka omad nõrkused. SEVIRI sensori kasutamise peamine eelis oleks palju lühema ajasammuga samadelt aladelt andmete kogumise võimekus. Käesolevas töös võrreldi MODIS ja SEVIRI saastunud pilvede omaduste mõõtmistulemusi hulga erinevate juhtumite korral, et hinnata, kas SEVIRI mõõtmistulemused on MODISega võrdväärsed.

Märksõnad: aerosool, pilved, globaalne soojenemine

CERCS: P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

The aerosol impact on clouds based on MODIS and SEVIRI satellite instruments

The anthropogenic radiative forcing by aerosol-cloud interactions is less precisely known than the effects of other anthropogenic radiative forcing agents. It is very likely that the effect of aerosols on clouds is overall climate-cooling. However, recent studies have shown that this cooling effect is not as strong as was previously believed. The MODIS instrument has been used in previous works for studying cloud properties, but MODIS can only provide one or two measurements per day. Using the SEVIRI instrument would offer a time series of measured cloud properties during daylight hours. The aim of this study was to compare both instruments' measured values of polluted cloud properties in several distinct cases and determine, whether SEVIRI offers equivalent results to MODIS or not.

Keywords: aerosols, clouds, global warming

CERCS: P500 Geophysics, physical oceanography, meteorology

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
1.1 Globaalsed kliimamuutused	4
1.2 Aerosoolid ja nende mõju Maa kiirgusbilansile.....	4
1.3 Saastunud pilvede uurimine	7
1.4 Töö eesmärk	7
2. Metoodika.....	8
2.1 Muutused pilvi iseloomustavates füüsikalistes suurustes	8
2.2 MODIS ja SEVIRI	9
2.3 Uuritud geograafiline piirkond.....	11
3. Tulemused	15
4. Kokkuvõte ja järeldused	20
Tänuavaldused	21
Kasutatud kirjandus	22
Lisa A. Näide Pythoni koodist	24
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	27

1. Sissejuhatus

1.1 Globaalsed kliimamuutused

Tööstusrevolutsioonile järgnenud järjepidevalt soojenemisele kalduvad muutused Maa keskmises temperatuuris on küllaltki hästi dokumenteeritud. Soojenemine tuleneb peamiselt inimtegevuse tulemusena atmosfääri lisandunud hästi segunenud kasvuhoonegaaside mõjust Maa kiirgusbilansile [1]. Suurim mõju on süsihappegaasil, mis moodustab pea kaks kolmandikku kogu antropogeensete kasvuhoonegaaside mõjust kiirgusbilansile (Joonis 1).

Kasvuhooneefekt tuleneb asjaolust, et Päikeselt Maale saabuva kiirguse ja Maa kiirguse lainepikkuse vahemikud on erinevad, kuna nende temperatuurid on väga erinevad. päikesekiirguse intensiivsus on suurim nähtava valguse piirkonnas, samas kui Maa kiirgus on kõige intensiivsem kauginfrapunases vahemikus. Veeaur, süsihappegaas ning teatud teised gaasid (mida kokkuvõtvalt kutsutakse kasvuhoonegaasideks) on kauginfrapunases vahemikus üsna suure neelduvusega [2].

Kasvuhooneefekt ei ole tegelikult iseenesest elule Maal halb vaid teatud määral hädavajalik ning käib nähtavat valgust läbilaskva atmosfääri olemasoluga looduslikult kaasas ka ilma inimtegevuseta. Maapinnalt või atmosfäärist endast eralduvat kiirgust neelavate ainete täiendaval atmosfääri lisamisel aga olukord muutub, sest looduskeskkond ei ole nii kiire soojenemisega, kui praegu aset leiab, kohanenud [3].

1.2 Aerosoolid ja nende mõju Maa kiirgusbilansile

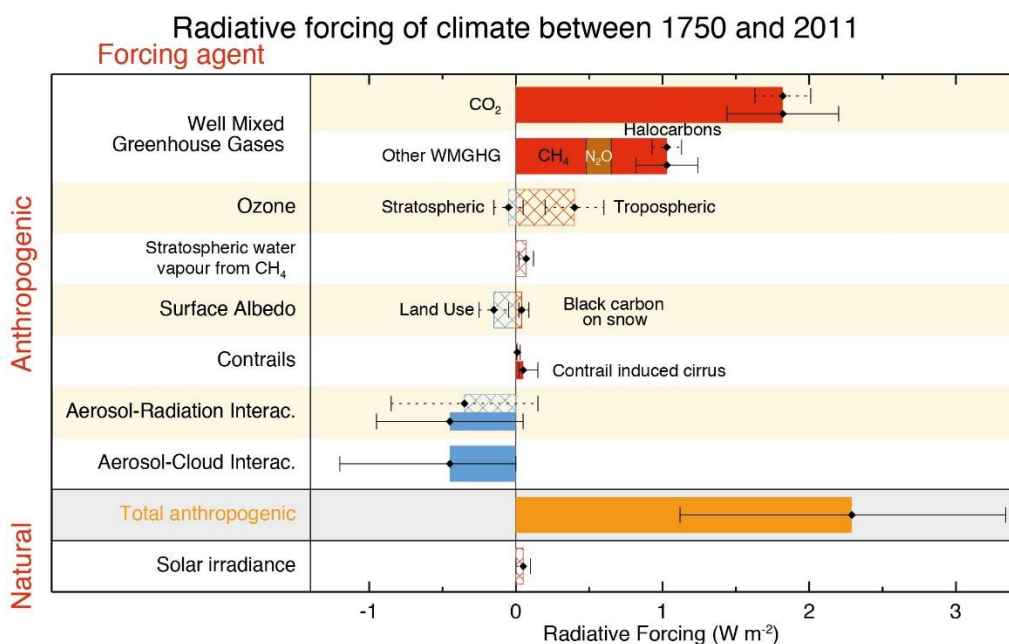
Teiseks suureks inimtekkelise kliimamõju teguriks on aerosoolid. Aerosoolid kujutavad endast vedelas või tahkes faasis osakeste suspensiooni gaasis. Osakeste suurused varieeruvad mõnest nanomeetrist ligikaudu 10 mikromeetrini. Kliimamõju seisukohalt on olulised aerosoolid, mis püsivad atmosfääris suspensioonis vähemalt mõne tunni [3].

Atmosfääris leiduvaid aerosoole saab tekke põhjal jagada primaarseteks ja sekundaarseteks. Primaarsed aerosoolid jõuavad atmosfääri juba moodustunud vedelas või tahkes faasis osakestena, sekundaarsed aerosoolid tekivad gaasilistest allikatest nukleatsiooni käigus [4].

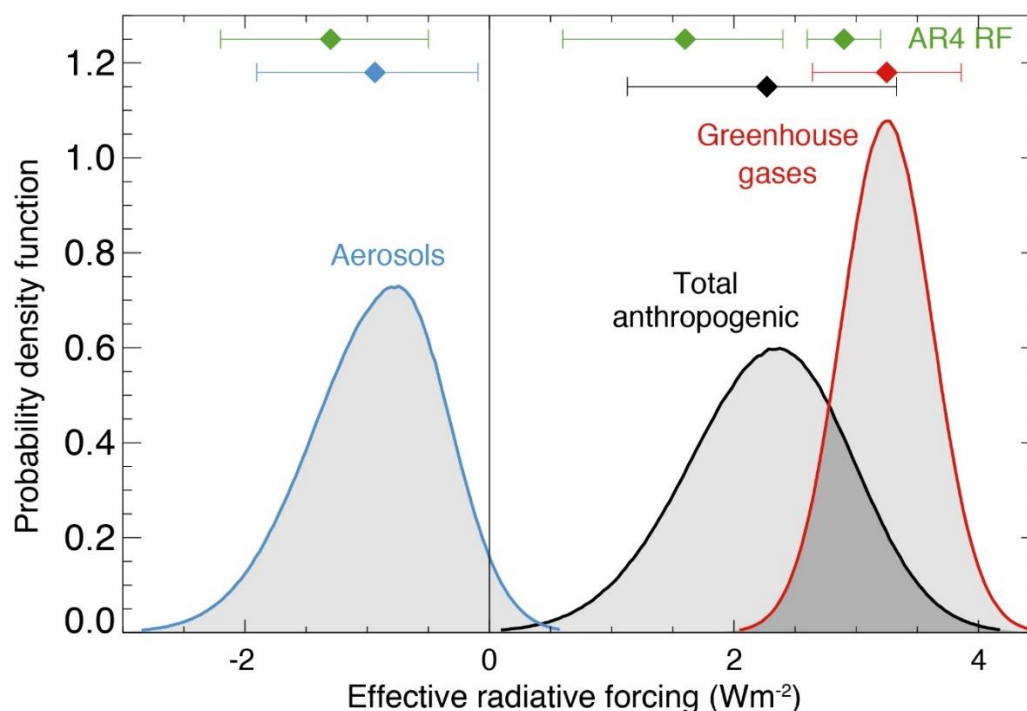
Teine viis atmosfääri aerosoolide jagamiseks on nende keemiline koostis. Sel viisil jagades on aerosoolide tüüpideks anorgaanilised (nt sulfaadid, nitraadid, ammonium, meresool), orgaanilised, mineraalsed (kõrbetest pärinev tolmu), primaarsed bioloogilised aerosoolid ja

tahm. Suuresti inimtegevuse tagajärjel atmosfääri jõudvateks aerosoolideks on sulfaadid, ammoonium, nitraadid ja tahm [5].

Aerosoolide mõju Maa kiirgusbilansile ja seeläbi ka kliimale jaguneb kaheks komponendiks. Nendeks on otsesed interaktsioonid päikesekiirgusega ning mõju pilvedele (Myhre *et al*, 2013). Mõlema efekti mõju on suure tõenäosusega jahutav, aga seda mõju on globaalsel tasemel raske täpselt hinnata. Seetõttu on antropogeensete aerosoolide otsene ja kaudne mõju Maa kiirgusbilansile seotud suure määramatusega (joonised 1 ja 2).



Joonis 1. Erinevate tegurite mõju Maa kiirgusbilansile aastate 1750 ja 2011 vahel [1].



Joonis 2. Antropogeensete tegurite mõju Maa kiirgusbilansile [1].

Aerosoolide otsesed interaktsioonid kiirgusega seisnevad aerosooli osakeste poolt päikesekiirguse hajumises ja neeldumises. Nende nähtuste puhul on tegemist üksikjuhtumites jälgitavate ja ennustatavate mõjudega, aga erinevate aerosoolide omadused ja nendest tulenevalt aerosoolide erinevad mõjud päikesekiirgusele muudavad ülemaailmsete mudelite loomise keerukaks [5].

Inimtekkeliste aerosoolide otsese kiirgusliku mõju täpse määramise hindamise teeb keerukaks ka erinevate efektide samaaegne väljendumine. Näiteks tahm üheaegselt soojendab seda atmosfääri kihti, kus ta asub, aga samas ka jahutab enda all olevat maapinda, kuna aluspinnani jõuab vähem päikesekiirgust [6].

Aerosoolide kaudne mõju Maa kiirgusbilansile seisneb pilvede omaduste muutmises. Atmosfääritingimustel pilved tegelikult üldse tekivad kondensatsioonituumadena käituvate aerosooliosakeste olemasolul [2]. Kui pilve tekkealas on suur kontsentratsioon väikeseid kondensatsioonituumasid ehk aerosoole, on kondenseeruvad pilvepiisad väiksemad ning arvukamad. Inimtekkelistest saasteallikatest pärinevad aerosoolid toimivad samuti kondensatsioonituumadena ning mõjutavad pilvede tekketingimusi selliselt, et kondenseerunud pilvepiisad on väiksemad kui mittesaastunud pilvedes [7].

1.3 Saastunud pilvede uurimine

Inimtegevuse poolt atmosfääri lisatud aerosoolide mõju pilvede omadustele on tegelikult suhteliselt palju uuritud [8]. Coakley et al keskendusid oma 1987. aasta uuringus laevateede kohal asuvatele pilvedele. Avamere kohal laevade heitgaasidest põhjustatud saastejäljed eristuvad ümbritsevatest pilvedest vaid pikalt stagnatsioonis olnud ilmaolude korral, kuna muudel juhtudel on õhk saastejälgede tuvastamiseks liialt läbi segunenud [9].

Praeguseks on aerosoolide mõju pilvedele ning sademete tekkele väikestel skaaladel (kuni mõnikümmend meetrit) suhteliselt põhjalikult uuritud. Vähem selgelt on määratletud aerosoolide mõju suurtele skaaladele (terved pilved, pilvesüsteemid, globaalsed protsessid) ning üldiselt jää tekkele pilvedes [10].

Lisaks laevateedele on inimtekkeliste aerosoolide allikateks, mille mõju saab pilvede omadustest detekteerida, veel ka näiteks nafta rafineerimistehased, kivisöel baseeruvad elektrijaamad, metsatulekahjud ja linnad [8].

1.4 Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärk on uurida inimtekkeliste aerosoolide kaudset kliimamõju pilvede omaduste mõjutamise kaudu. Töös võrreldakse satelliitinstrumentidega MODIS ja SEVIRI kogutud andmeid saastunud pilvede omaduste kohta, et hinnata, kas SEVIRI tulemused on MODISega võrdväärsed. Mainitud sensored võrreldakse, kuna kuigi MODIS leiab sarnase temaatikaga töodes kasutust [8], on instrumendi ajasammuks tema polaarorbiidi tõttu üks päev [11]. SEVIRI seevastu, tänu oma geostatsionaarsele orbiinile, annab 15-minutilise ajasammuga ülevaate pilvede omadustest.

2. Metoodika

2.1 Muutused pilvi iseloomustavates füüsikalistes suurustes

Pilve optiline paksus sõltub pilve vee hulgast ja piiskade raadiusest kujul

$$\tau \sim \frac{l}{r}, \quad (1)$$

kus τ on pilve optiline paksus, l pilve vee hulk ja r pilvepiisa raadius.

Pilvepiisa raadius on pilve kondenseerunud osakeste raadiuste kaalutud keskmine mingis piirkonnas [12]. Mõõtühikuks üldiselt m või μm . Pilve vee hulk on keskmine vee mass $1m^2$ pindalaga pilve osas. Mõõtühikuks üldiselt g/m^2 või kg/m^2 . Optiline paksus iseloomustab seda, kui suur osa pilvele langevast kiirgusest pilves neeldub või hajub. Tegemist on ühikuta suurusega [2].

Seosest (1) lähtuvalt saab selgitada Twomey efekti olemust. Twomey efekt (efekt on saanud nime füüsik Sean Twomey järgi) kirjeldab olukorda, kus aerosooliosakeste kontsentratsiooni tõstmisel suureneb pilve optiline paksus. Efekti füüsikaliseks põhjenduseks on see, et aerosoolide lisamisel piiskade arvkontsentratsioon suureneb ning pilvepiisa raadius väheneb, mis viib piiskade kogupindala ning seeläbi ka pilvede peegelduvusteguri (optilise paksuse ja albeedo) suurenemiseni [13].

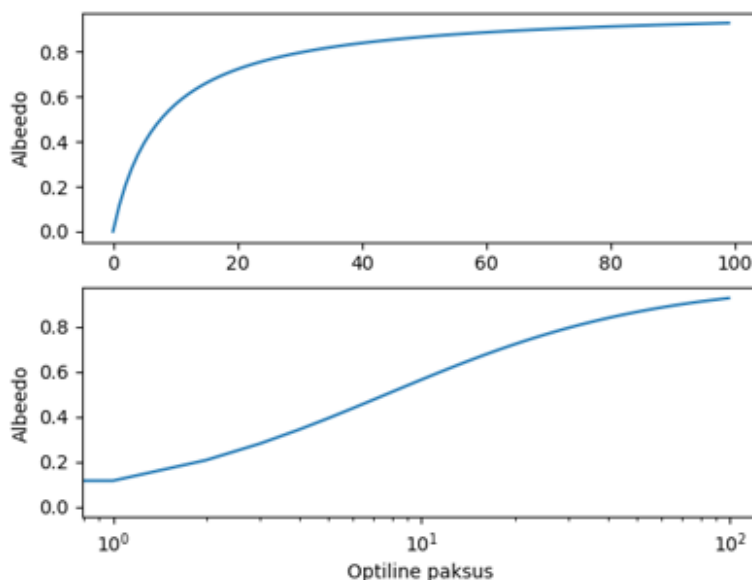
Samal ajal põhjustavad väiksemad osakesed tihti ka pilve vee hulga muutuseid. Varem on arvatud, et vee hulk ühesuunaliselt kasvab pilvedes, mis viitaks sellele, et inimtekkeliste aerosoolide kliimamõju pilvede omaduste mõjutamise kaudu oleks võrdlemisi tugevalt kliimat jahutav. Hiljuti on aga leitud, et vee hulk saastunud pilvedes hoopis väheneb. Vee hulga vähenemine viitab sellele, et aerosoolide kaudne mõju Maa kiirgusbilansile on nõrgemalt jahutav kui ainult Twomey efekti põhjal võiks arvata [8].

Pilve albeedo on pilve optilise paksusega otseselt seotud. Kui pilve optiline paksus kirjeldab nii neeldumist kui hajumist, siis albeedo näitab, kui suur osa pilvele langevast kiirgusest hajusalt tagasi peegeldub [2]. Üks võimalik lihtsustatud lähendus pilve albeedo arvutamiseks on

$$R_{\alpha} = \frac{0,13 \tau}{1+0,13 \tau}, \quad (2)$$

kus R_{α} tähistab pilve albeedot [14].

Lisaks optilisele paksusele mõjutab pilve albeedot ka kõrgus [2]. Pilve albeedo sõltuvust optilisest paksusest kirjeldab joonis 3. Nagu jooniselt ka näha on, kasvab albeedo madalatel optilise paksuse väärtustel kiiremini. Pilve optilise paksuse suurenedes läheneb albeedo asümptootiliselt ühele.



Joonis 3. Pilve albeedo sõltuvus pilve optilisest paksusest lineaarses ja logaritmilises skaalas.

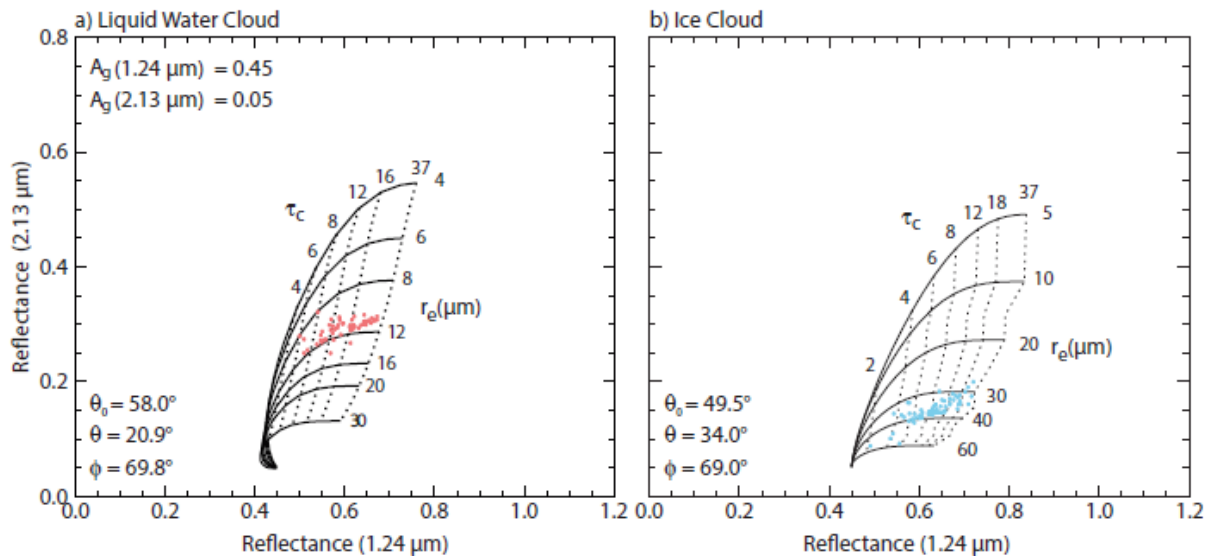
2.2 MODIS ja SEVIRI

MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) sensorid on passivsed satelliitkaugseire sensorid, mis paiknevad NASA satelliitidel Aqua ja Terra. Mõlemad satelliidid on päikesesünkroonsetel polaarorbiitidel, kusjuures Terra orbiit kulgeb Maa päikesevalgusega küljel põhjast lõunasse hommikuse ajastusega, Aqua liigub pärastlõunal lõunast põhja [11]. Käesolevas töös on kasutatud Terra satelliidil asuva MODIS instrumendi andmeid.

MODIS sensoril on 36 spektraalkanalit lainepikkuste 0,4 μm kuni 14 μm vahemikus. Instrumenti on võimalik kasutada mitmete maapinna, ookeanide ning pilvede omaduste määramiseks. Spektraalkanalite ruumilised lahutused on 250 m (kanalid 1 ja 2), 500 m (kanalid 3-7) ja 1 km (kanalid 8-36) [11].

MODIS sensorit on pilvede uurimisel võimalik kasutada nii pilvede füüsiliste kui kiirguslike omaduste määramiseks. Erinevaid infrapuna ja nähtava valguse kanaleid kasutades tuletatakse MODISE kogutud andmetest pilve sademete agregaatolek, pilvepiisa raadius ja pilve optiline

paksus [15]. Pilvepiisa raadiuse ja optilise paksuse samaaegse määramise põhimõtte seisneb sensori kahe erineva lainepikkusega kanali mõõdetud peegeldusteguri võrdlemises, mille kohta annab illustreeriva näite joonis 4. Võrreldavad kanalid on valitud selliselt, et ühes kanalis oleks tugevalt ülekaalus valguse hajumine pilve piiskadelt (nähtav kanal) ja teises kanalis toimuks ka päikesekiirguse neeldumine pilves (lähis-infrapunane kanal) [16]. Infrapunastes lainepikkustes kanaleid kasutades on võimalik määrata näiteks temperatuuri ja seeläbi pilvede kõrgust [15].



Joonis 4. Teoreetiline pilvede peegeldustegurite suhe MODIS instrumendi 1,24 μm ja 2,13 μm lainepikkustes tundlike spektraalkanalite vahel a) vedelate sademetega pilves ning b) jääsademetega pilves. Katkendlikud jooned näitavad erinevaid optilise paksuse väärtusi (tähis joonisel τ_c), pidevad jooned näitavad erinevaid pilvepiisa raadiuseid (tähis joonisel r_e). Teoreetiline suhe kehtib märgitud maapinna albeedo (A_g) ja spetsiifiliste vaatenurga ning Päikese kõrguse korral. Punktidega on tähistatud mõõtmistulemused arktiliste vee- ja jääpilvede kohalt [16].

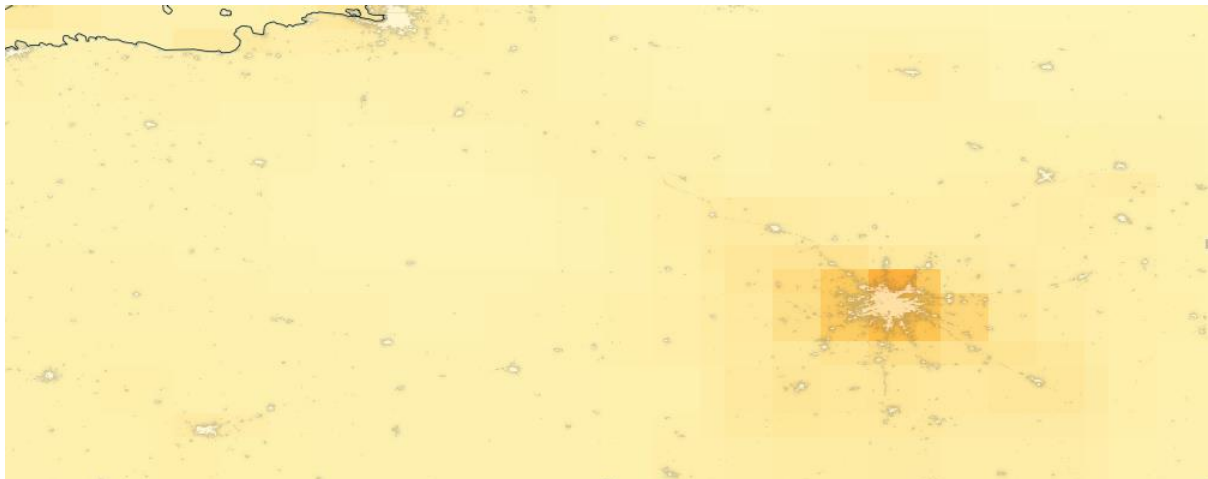
SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) on EUMETSATi (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) kasutuses olev radiomeeter. Sensor asub MSG (*Meteosat Second Generation*) geostatsionaarsetel satelliitidel. SEVIRI suudab anda ülevaate tervest instrumendi vaateväljas olevast maa-alast iga 15 minuti järel. Sensoril on 12 spektraalset kanalit, millest 4 asuvad nähtavas või lähis-infrapunases vahemikus (0,4-1,6 μm) ja 8 infrapunases (3,9-13,4 μm). HRV (*High Resolution Visible*) kanali ruumiline lahutusvõime on ekvaatoril 1 km, ülejäänud kanalite lahutusvõime on 3 km [17].

SEVIRI kogutud andmetest pilvi kirjeldavate suuruste tuletamiseks kasutatakse CPP (*Cloud Physical Properties*) algoritmi. Esmalt eraldatakse pilvedeta pikslid osalise või täieliku pilvkattega pikslitest. Seejärel võrreldakse nähtava kanali ($0,6\ \mu\text{m}$) ja lähis-infrapunase kanali ($1,6\ \mu\text{m}$) pilvede peegeldustegureid ja täiendavalt kasutatakse infrapuna kanali andmeid. See võimaldab määrata pilvede esmased omadused, milleks on pilve ülapööri temperatuur, sademete agregaatolek, optiline paksus ja pilvepiisa suurus. Viimaks leitakse esmaste omaduste põhjal arvutuslikult pilvede ülejäänud omadused, muuhulgas vee hulk, pilvepiiskade arvkontsentratsioon ja pilve geomeetriline paksus [18]

2.3 Uuritud geograafiline piirkond

Töös vaadeldud piirkonnaks on Moskva läheduses ning sellest loodesse ja läände jääv ala ligikaudu Soome lahe ja Läänemereni. Geograafilistes koordinaatides oli vahemikuks $53,0 - 60,2^\circ\text{ N}$ ja $24,5 - 42,3^\circ\text{ E}$.

Moskva ümbruskond on käesoleva töö kontekstis sobilik valik, kuna piirkonnas asuvad suuremad linnad suhteliselt hõredalt. Tänu sellele eristuvad linnadest põhjustatud saastunud alad pilvedes tihti üsna selgesti saastumata aladest. Moskva suhtelist eraldatust nii suurlinna kui saasteallikana illustreerib vääveldioksiidi emissioone kujutav joonis 5.



Joonis 5. Vääveldioksiidi emissioonide intensiivsus. Oktoober 2016. Joonis tehtud EOSDIS Worldview abil MERRA-2 andmeid kasutades. Tumedamad toonid näitavad intensiivsemaid emissioone. Lisakihi on taustal kujutatud ka Suomi NPP VIIRS instrumendiga kogutud andmed öistest valgustustest 2016. aastal.

2.4 Andmete analüüs

MODIS andmete visualiseerimiseks oli töö käigus kasutusel NASA EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System) Worldview rakendus. Worldview kaudu on võimalik ligi pääseda rohkem kui 900-le globaalse katvusega andmekihile, millest paljusid uuendatakse igapäevaselt. Terra MODIS andmekihid on saadaval kogu sensori tööperioodist, alates 24. veebruarist 2000. MODIS andmete täiendav töötlemine ei olnud vajalik, kuna Worldview rakendus tegeles sellega automaatselt [19].

SEVIRI kogutud andmed olid töös kättesaadavad NetCDF 4 andmeformaadis. NetCDF on oma ülesehituselt suunatud andmemassiive kasutavatele teadusharudele ning on seega SEVIRI kogutud andmetele sobilik formaat. NetCDF failidega on võimalik tegeleda, kasutades muuhulgas programmeerimiskeeli C, C++, Java ja Python [20]. Antud töös kasutati andmeanalüüsiks Pythonit.

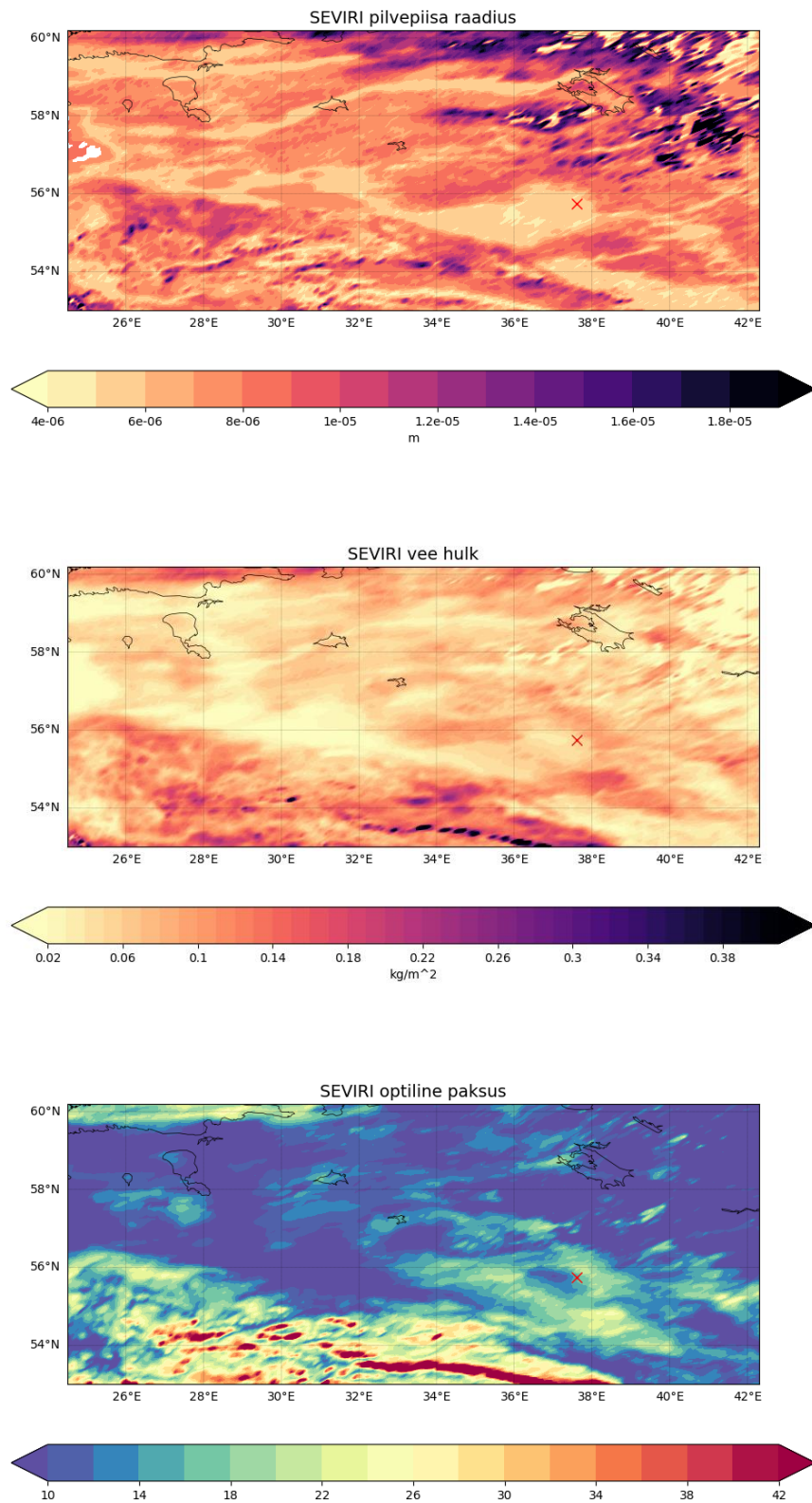
SEVIRI andmete töötlemine toimus Tartu ülikooli atmosfäärifüüsika labori unix serveris (ülikooli sisevõrgus leitav aadressil heike.hpc.ut.ee). Server valiti kasutamiseks andmete analüüsis kahel peamisel põhjusel. Esiteks oli Python (versioon 2.7.15) ja kõikvõimalikud lisateegid juba varasemalt serverisse paigaldatud. Teiseks on SEVIRI NetCDF formaadis failid üsna suure andmemahuga (suurusjärgus 5Gb) ning neid oleks olnud ebapraktiline personaalarvutis hoiustada või töödelda.

SEVIRI andmete visualiseerimiseks kasutati töös Pythoni teegi *matplotlib* tööriistakomplekti *basemap*. *Basemapi* kasutatakse kahemõõtmeliste andmete geograafiliseks kujutamiseks. Tööriistakomplektis on 25 erinevat kaardiprojektsiooni, mille vahel kujutatavaid andmeid ka transformeerida saab. Peamisteks *basemapi* kasutusvaldkondadeks on meteoroloogia ja okeanograafia, aga tööriistakomplekt leiab kasutust ka näiteks bioloogias, geoloogias ja geofüüsikas [21].

Töö käigus kirjutatud kood näitab kursori all oleva punkti geograafilisi koordinaate ning korraga ühe koordinaatidele vastava pilve iseloomustava suuruse väärtust (lisa A).

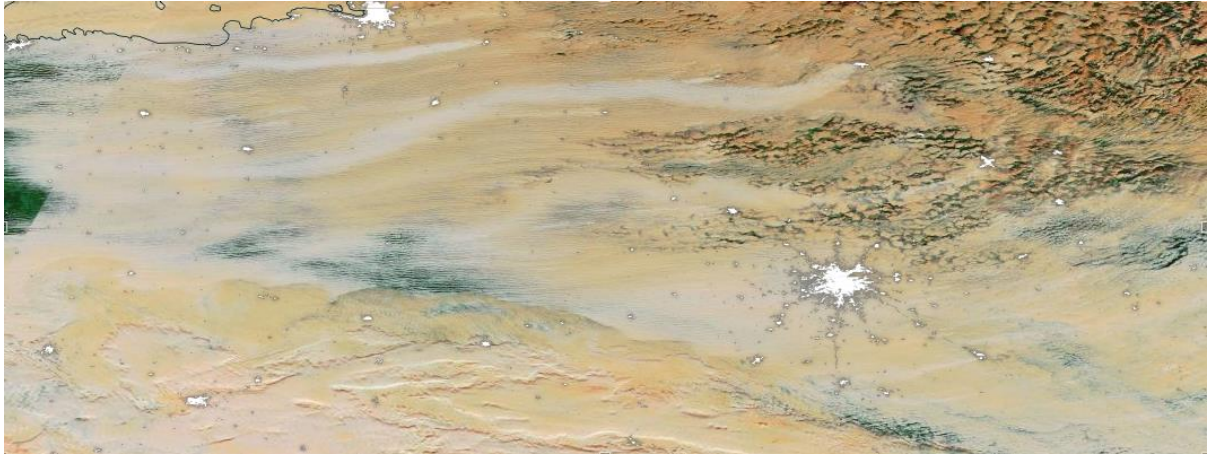
Esmalt leiti EOSDIS Worldview abil, mis kellaaegadel Terra MODIS Moskva lähedast piirkonda uuritud kuupäevadel ületas. Selle põhjal valiti SEVIRI andmestikust MODIS ülelennule kellaaajaliselt kõige lähedasem tulemus.

Joonis 6 annab näite Pythoni keskkonnas *matplotlibi* kasutades kujutatud SEVIRI andmetest.



Joonis 6. SEVIRI pilvepiisa raadius, pilve vee hulk ja pilve optiline paksus uuritud piirkonnas. Kuupäev: 11.10.2016. Kellaeg: 9:00 UTC.

Järgmisena määratleti EOSDIS Worldview abil Terra MODIS kanalite 3, 6 ja 7 valemärvides komposiitpilte kasutades pilvede saastumata aladest selgelt eristunud saastunud alad. Mainitud spektraalkanalite komposiitpildil on saastunud pilved valget värvi, samas kui saastumata pilved on kollakad, pruunikad või oranžid (joonis 7).



Joonis 7. EOSDIS Worldview valemärvides komposiitpilt uuritud piirkonnast kasutades MODISE kanaleid 3, 6 ja 7. Kuupäev: 11.10.2016. Kellaaeg: 8:55 UTC. Saastunud pilved avalduvad heledate piirkondadena. Lisakihina on taustal kujutatud ka Suomi NPP VIIRS instrumendiga kogutud andmed öistest valgustustest 2016. aastal.

Saastunud alade määratlemise järel märgiti üles geograafiliselt lähestikku asunud saastunud ja saastumata punktide pilvepiisa raadiused, pilve vee hulga ja optilised paksused. Albeedo väärtuseid sel viisil ei määratud, kuna EOSDIS Worldview's ei ole MODISE andmete põhjal koostatud andmekihti pilvede albeedost. SEVIRI andmete jaoks kasutatud koodist on näide lisas A.

3. Tulemused

Kuupäev	Kellaaeg	Geogr. laius	Geogr. pikkus	MODIS r (s)	SEVIRI r (s)	MODIS l (s)	SEVIRI l (s)	MODIS τ (s)	SEVIRI τ (s)	MODIS r (p)	SEVIRI r (p)	MODIS l (p)	SEVIRI l (p)	MODIS τ (p)	SEVIRI τ (p)
16.10.2006	08:50	54.9-55.2	35-35.2	4.2	5.1	0.624	0.17	24.4	17.2	6.4	8.1	0.122	0.06	21.1	25.6
26.10.2006	09:30	58.4-58.65	39.05	6.5	6.1	0.073	0.03	13.5	7.3	12.5	10	0.104	0.05	15.1	8.1
29.04.2007	09:25	57.3	39.7-39.95	5.3	5.9	0.045	0.03	11.8	10.3	7.7	8.3	0.085	0.05	19.2	14.5
16.10.2007	08:20	58.75	38.3-38.6	4.6	3	0.077	0.04	23.9	13.1	9.7	8	0.069	0.07	11.8	12.4
16.09.2008	08:20	55.6	35.7-36.0	8.7	8.8	0.107	0.1	14.2	13.4	12.6	11.8	0.399	0.27	43.4	34
17.09.2008	09:05														
18.09.2008	08:10	53.55-53.8	39.6	6.1	5.3	0.086	0.04	21.4	11.4	11.4	8.3	0.145	0.13	27.8	20.2
06.11.2008	08:55	56.8	40.0-40.3	7.8	6.8	0.183	0.09	35.8	21.9	15.3	14	0.15	0.17	15.4	15.9
25.10.2009	08:00	53.95	39.6-39.9	6.5	6.7	0.168	0.23	56.2	51.5	10.7	9.9	0.275	0.22	60.6	33.8
16.10.2010	09:10	55.85-56.1	37.9	6.9	5.8	0.1	0.05	19.8	13.2	10.7	9.3	0.246	0.1	28.8	15.3
24.10.2011	09:30	55.2	28.3-28.45	6.8	5.2	0.054	0.02	12.75	6.1	15.9	13	0.119	0.13	11.3	11.5
27.10.2011	08:30	55.35-55.55	34.65	8.0	5.6	0.08	0.04	15.9	9.8	10.9	10	0.285	0.11	40.2	15.1
02.11.2011	09:20	55.8-56.0	39.45	7.8	7.9	0.255	0.13	52.2	27.7	11.9	12.8	0.318	0.19	41.8	28.1
13.11.2011	09:05	55.7-55.85	38.35	5.3	5	0.188	0.05	56.5	14.4	11.1	13.2	0.139	0.08	19.8	6.1
13.02.2015	08:40	55.7-58.0	37.8	6.4	6.3	0.275	0.16	67.5	36.11	11.2	10.8	0.37	0.15	52.2	20.9
14.02.2015	09:25	55.45-55.7	30.6	6.5	5.8	0.096	0.06	22.2	14.9	9.3	10.7	0.219	0.13	37.3	18
20.10.2015	08:35	59.35-59.5	34.85	4.6	5.7	0.032	0.03	11.1	6.4	11.2	6.8	0.064	0.02	9.1	4.3
10.10.2016	09:45	58.8-59.0	36.3	6.4	5	0.047	0.04	12.3	10.5	10.7	8.7	0.093	0.04	13.2	8.9
11.10.2016	08:55	58.7-58.95	36.3	5.7	5	0.042	0.04	13.7	10.8	12.4	13.2	0.129	0.09	16.5	9.6
12.10.2016	09:35	59.0-59.25	34.1	5.4	5	0.116	0.06	33.5	18.8	11.9	9.8	0.12	0.08	15.9	12.8
13.10.2016	08:40	59.3	32.0-32.15	7.3	8.8	0.255	0.2	54.1	32.1	11.9	11.9	0.326	0.19	43.3	29.4
16.10.2016	09:10	58.1	37.3-37.5	5.9	5	0.066	0.02	17.8	13	11.6	8.4	0.108	0.04	14.8	7.1
19.10.2016	08:05	53.6	37.7-37.9	4.6	4.1	0.059	0.02	19.8	11.4	9.1	8.6	0.246	0.14	41.8	23.4
01.10.2017	08:25	56.9-57.05	39.1	6.6	7.7	0.112	0.07	26.7	15.6	12.5	11.7	0.103	0.11	13.2	16.4

Tabel 1. Uurimispiirkonnast määratud suurused saastunud ja saastumata pilvedega aladelt.

Lühendid: r – pilvepiisa raadius (μm), l – vee hulk (kg/m^3), τ – optiline paksus, s - saastunud, p – puhas (saastumata).

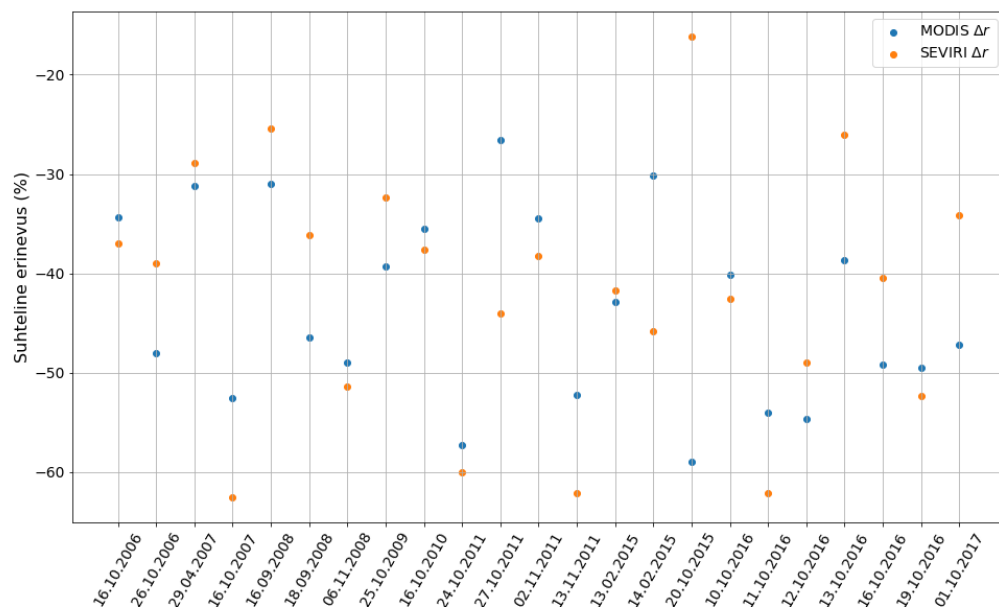
Tabelis 1 on välja toodud töö käigus kogutud andmed. Kuupäevalised piirangud seadsid SEVIRI andmed, mis pärinesid 24 kuupäevast aastatel 2006-2017. Kellaajalised piirangud seadsid MODISe ülelennu kellaajad. Instrumentide erisuste tõttu esineb SEVIRI ja MODISe mõõtmistes kuni 7,5-minutilisi erinevusi. Saastunud ja saastumata alade vahe oli mõnikümmend kilomeetrit - alla 0,3 pikkus- või laiuskraadi.

Töö käigus uurimise all olnud päevadest ei leidunud uurimispiirkonnas ühel juhul (17.09.2008) MODISe ülelennu ajal piisavalt selgesti saastumata pilvedest eristuvaid saastunud alasid.

Tulemusi ei ole arvuliselt piisavalt, et nende põhjal laiaulatuslikke statistilisi järeldusi teha, aga sellegipoolest saab kogutud andmetest teatud tendentse jälgida.

Pilvepiisa raadiuse suhtelised erinevused näitavad, et saastunud pilvedes on piisad väiksemate mõõtmistega (Joonis 8). Enamikus tulemustest kahaneb pilvepiisa raadiuse 25% kuni 60% võrra. Mõlema sensori kõik andmepunktid näitavad pilvepiisa raadiuse kahanemist nagu aerosoolide mõjust ongi eeldada.

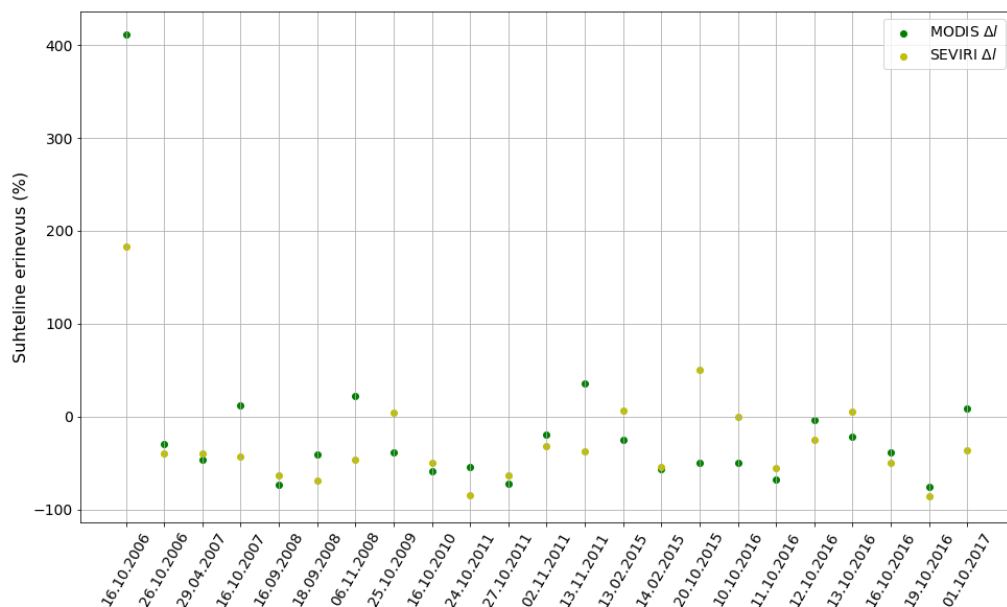
MODISe andmete põhjal vähenes piisasuurus saastunud pilves saastumata pilvega võrreldes keskmiselt 43,6% võrra. SEVIRI mõõtmistulemuste põhjal vähenes pilvepiisa raadius keskmiselt 41,9% võrra.



Joonis 8. Pilvepiisa raadiuse suhtelised erinevused saastunud ja saastumata pilve osade vahel MODIS ja SEVIRI andmete põhjal.

Vee hulga muutustest on näha, et enamikul juhtudest toimus suhteline pilve vee hulga vähenemine (joonis 9). Märkimisväärseks erandiks on tulemus 16.10.2016, kus nii MODIS-e kui SEVIRI põhjal oli vee hulk saastunud pilves mitusada protsenti suurem kui saastumata pilves. Selline olukord võib juhtuda näiteks siis, kui saastunud pilve eluiga on pikem võrreldes saastumata pilvega [8].

MODISe andmete põhjal pilve vee hulk keskmiselt vähenes 14,6% võrra, SEVIRI põhjal vähenes vee hulk keskmiselt 27,2% võrra. MODISe keskmine on sarnane Tolli jt [8] töös leitud rasketööstuse kohal asunud saastunud pilvede vee hulga suhtelisele vähenemisele, milleks oli 14%.



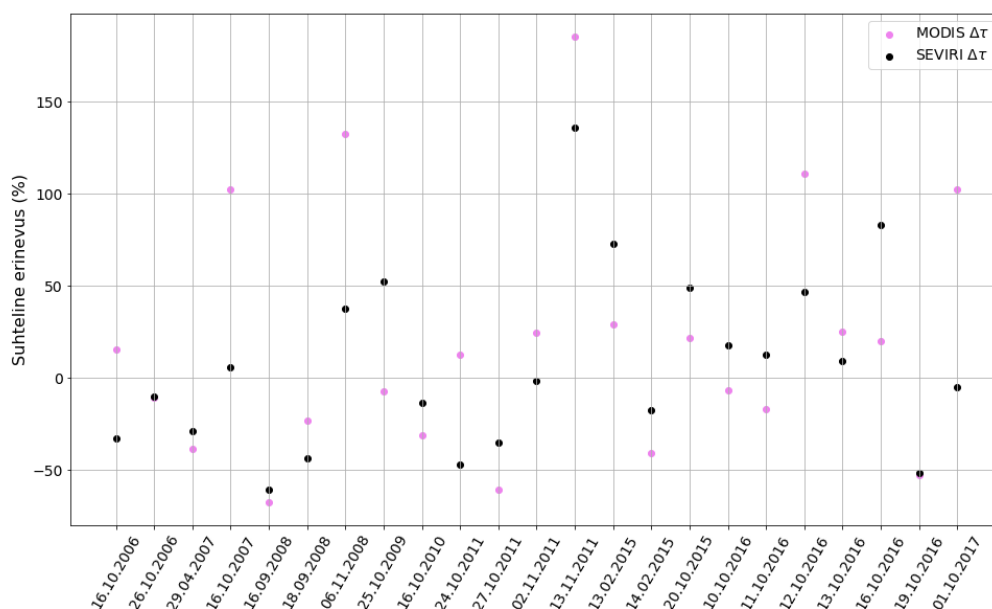
Joonis 9. Pilve vee hulga suhtelised erinevused saastunud ja saastumata pilve osade vahel MODIS ja SEVIRI andmete põhjal

Nii optilise paksuse kui pilve albeedo tulemustes on näha sarnasel hulgal suurenemisi ja vähenemisi (joonised 10 ja 11). Pilve albeedo ja optiline paksus suurenevad juhul kui pilvepiisa raadiuse kahanemisest tingitud muutus on tugevam pilve vee hulga kahanemisest tingitud muutusest.

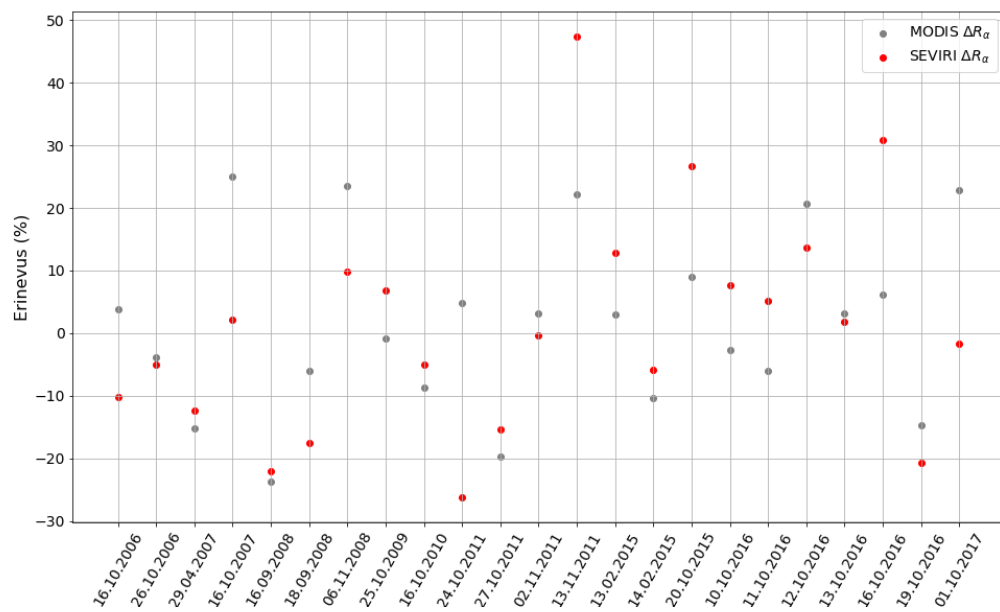
Pilve optilise paksuse suhtelised muutused olid suunalt praktiliselt võrdselt jaotunud. MODISe andmete põhjal toimus suhteline kasv 12 juhul 23-st, SEVIRI põhjal 11 juhul. Mõlema instrumendi mõõtmistulemuste põhjal optiline paksus keskmiselt kasvas. MODISe puhul

suurenes saastunud pilve optiline paksus võrreldes saastumata pilvega keskmiselt 18,6% võrra, SEVIRI puhul 7,7% võrra.

Kuna pilve albeedo on käesolevas töös arvatatud pilve optilise paksuse põhjal valemit (2) kasutades, on muutused saastunud pilvede albeedos alati samasuunalised muutustega optilises paksuses, aga arvuliselt väiksemad. Suurenemisi ja vähenemisi on mõlema instrumendi andmete põhjal praktiliselt sama palju. MODISi põhjal kasvas pilve albeedo saastunud pilvedes keskmiselt 1,5% võrra, SEVIRI põhjal oli keskmine suhteline kasv 1,0%.



Joonis 10. Pilve optilise paksuse suhtelised erinevused saastunud ja saastumata pilve osade vahel MODIS ja SEVIRI andmete põhjal



Joonis 11. Pilve albeedo suhtelised erinevused saastunud ja saastumata pilve osade vahel MODIS ja SEVIRI andmete põhjal.

4. Kokkuvõte ja järeldused

Töös uuriti aerosoolide mõju pilvedele, mis on suurima määramatusega inimtekkeline Maa kliimat mõjutav tegur. Võrreldi satelliitinstrumentide MODIS ja SEVIRI saastunud pilvede omaduste (pilvepiisa raadius, pilve vee hulk, pilve optiline paksus) mõõtmistulemusi. Uuringus keskenduti Moskva suhtelises läheduses olevale piirkonnale, kuna Moskva asub teiste suurlinnadega võrreldes suhteliselt eraldatud piirkonnas, mille tulemusena avalduvad linnast tulenevad saastejäljed pilvedes üsna tihti. MODISE andmete analüüsimiseks kasutati EOSDIS Worldview rakendust, SEVIRI andmed olid kasutuses NetCDF formaadis ning neid töödeldi Pythoni programmeerimiskeskkonnas.

Töö tulemustest järeldub, et SEVIRI andmeid kasutades ei tundu olevat võimalik MODISega täpselt võrreldavaid tulemusi saada, kuigi MODIS ja SEVIRI instrumentide põhjal arvutatud aerosoolide mõju on kvalitatiivselt sarnane. Kõigil uuritud juhtudel oli saastunud alade pilvepiisa raadius väiksem kui saastumata aladel. Pilvepiisa raadiuse keskmine suhteline vähenemine oli instrumentidel sarnane. Vee hulk keskmiselt samuti vähenes, aga SEVIRI andmed näitasid ligikaudu kaks korda suuremat suhtelist vähenemist kui MODISE andmed. Nii optiline paksus kui albeedo keskmiselt veidi tõusid. Suhteline kasv oli intensiivsem MODISE andmete põhjal.

Venemaa Euroopa osas on näha, et saastunud pilvedes kahaneb enamasti vee hulk. Vee hulga vähenemine toob kaasa ka optilise paksuse ja albeedo kahanemise. See mõju on vastupidine samuti saastunud pilvedes toimuvale pilvepiisa raadiuse kahanemisele ning järelikult ei kasva saastunud pilvede optiline paksus keskmiselt nii palju kui Twomey efektist oletada võiks.

SEVIRI võimekus anda ülevaade pilvede omadustest iga 15 minuti järel teeb seadmest väga kasuliku tööriista pidevas muutuses olevate suuruste uurimisel. Antud töö tulemused näitavad, et SEVIRI andmed on piiratud määral kasulikud, et aerosoolide mõju pilvedele ja pilvede vee hulcale edasi uurida. SEVIRI andmed võivad aidata täpsustada aerosoolide kliimamõju tugevust, aga soovituslik on SEVIRI andmeid alati täpsema satelliitinstrumenti mõõtmistega valideerida.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Velle Tolli abi ja konstruktiivse tagasiside eest kõigis töö osades. Lisaks soovin tänada ka Joosep Jantsonit töö keelelise poole ülevaatamise ja paranduste soovitamise eest.

Kasutatud kirjandus

1. Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Suurbritannia ja New York, NY, USA.
2. J. M. Wallace and P. V. Hobbs, Atmospheric science: an introductory survey, 2nd ed. Amsterdam; Boston: Elsevier Academic Press, 2006.
3. IPCC, 2013: Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA.
4. U. Pöschl, "Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 44, no. 46, pp. 7520–7540, 2005
5. Boucher, O., D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, V.-M. Kerminen, Y. Kondo, H. Liao, U. Lohmann, P. Rasch, S.K. Satheesh, S. Sherwood, B. Stevens and X.Y. Zhang, 2013: Clouds and Aerosols. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Suurbritannia, New York, NY, USA.
6. Voiland A., Aerosols: Tiny Particles, Big Impact, 2010.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>. Vaadatud 05.26.2020.
7. Possner, "Weak sensitivity of cloud water to aerosols," *Nature*, vol. 572, no. 7767, pp. 35–36, 2019.

8. V. Toll, M. Christensen, J. Quaas, and N. Bellouin, “Weak average liquid-cloud-water response to anthropogenic aerosols,” *Nature*, vol. 572, no. 7767, pp. 51–55, 2019.
9. J. A. Coakley, R. L. Bernstein, and P. A. Durkee, “Effect of Ship-Stack Effluents on Cloud Reflectivity,” *Science*, vol. 237, no. 4818, pp. 1020–1022, 1987.
10. D. Rosenfeld, S. Sherwood, R. Wood, and L. Donner, “Climate Effects of Aerosol-Cloud Interactions,” *Science*, vol. 343, no. 6169, pp. 379–380, 2014.
11. MODIS Web. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>. Vaadatud 05.12.2020.
12. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, “Cloud Effective radius,”
https://web.archive.org/web/20090724155507/http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/PIP/shtml/cloud_effective_radius.shtml. Arhiveeritud 07.24.2009. Vaadatud 05.27.2020.
13. S. Twomey, “The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 34, no. 7, pp. 1149–1152, 1977.
14. A. Lacis and J. Hansen, “A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth’s Atmosphere,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 118–133, 1974,
15. MODIS Atmosphere: Cloud Product. https://modis-images.gsfc.nasa.gov/MOD06_L2/index.html. Vaadatud 05.26.2020.
16. S. Platnick, M.D. King, K.G. Meyer, G. Wind, N. Amarasinghe, B. Marchant, G. T. Arnold, Z. Zhang, P. A. Hubanks, B. Ridgway, J. Riedi, MODIS Cloud Optical Properties: User Guide for the Collection 6 Level-2 MOD06/MYD06 Product and Associated Level-3 Datasets
17. J. Schmid, “The SEVIRI Instrument,” *Proceedings of the 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite. Data User’s Conference*, Bologna, Italy, 29 May–2 June 2000, Darmstadt, Germany, EUMETSAT ed. 2000, pp. 13-32
18. MSGCPP product description,
http://msgcpp.knmi.nl/mediawiki/index.php/MSGCPP_product_description.
Vaadatud 05.27.2020.
19. EOSDIS Worldview, <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>. Vaadatud 05.27.2020.
20. Unidata | NetCDF. <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>. Vaadatud 05.27.2020.
21. J. Whitaker, “Basemap Matplotlib Toolkit 1.2.1 documentation - Introduction”
<https://matplotlib.org/basemap/users/intro.html>. Vaadatud 05.27.2020).

Lisa A. Näide Pythoni koodist

```
from netCDF4 import Dataset
import numpy as np
import matplotlib as mpl
from os import listdir
from mpl_toolkits.basemap import Basemap
import matplotlib.pyplot as plt
#SEVIRI andmete kaust ja failid
direc = 'indir'
nc = listdir('indir')
nc.sort()
#uuritav fail
ncfile = direc+nc[18]
#kellaajad
tstep = [36, 38, 38, 33, 33, 36, 34, 35, 32, 37, 38, 34, 37, 36, 35, 37, 34, 39, 36, 38, 35, 37, 32,
34]
#uuritav kellaeg
timestep = tstep[18]
#uuritava suuruse saamine andmestikust
data = Dataset(ncfile,'r')
latitude = data.variables['lat'][:]
longitude = data.variables['lon'][:]
reff=data.variables['reff'][timestep,:,:]
reff=reff*1000000.0
#uuritava piirkonna koordinaadid
x1 = 24.5
x2 = 42.3
y1 = 53.0
y2 = 60.2
```



```

m = Basemap(projection='cyl',
llcrnrlat=y1,urcnrlat=y2,llcrnrlon=x1,urcnrlon=x2,lat_ts=(y1+y2)/2,resolution='i')

X_ax, Y_ax = m(longitude, latitude)

#Moskva tähistamine

lon_Moscow=37.617

lat_Moscow=55.75

x_Moscow,y_Moscow=m(lon_Moscow,lat_Moscow)

#kaardi joonistamine, pilvepiisa raadiuse väärtuste kaardile kandmine

coastwidth=0.5

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12,6))

m.drawcoastlines(linewidth=coastwidth,color='k')

m.drawparallels(np.arange(-
90.,92.,2.),labels=[1,0,0,0],color='black',dashes=[1,1],linewidth=0.2)

m.drawmeridians(np.arange(-
180.,184.,2.),labels=[0,0,0,1],color='black',dashes=[1,1],linewidth=0.2)

cs = m.contourf(X_ax,Y_ax,reff*10**(-6), levels=np.arange(4*10**(-6), 20*10**(-6),
1*10**(-6)),shading='flat',cmap=plt.cm.magma_r,extend='both')

cbar=plt.colorbar(cs, orientation='horizontal',format='%g')

cbar.set_label('m')

for t in cbar.ax.get_xticklabels():

    t.set_fontsize(10)

plt.title('SEVIRI pilvepiisa raadius', fontsize=14)

m.plot(x_Moscow, y_Moscow, 'rx', markersize=8)

#pilvepiisa raadiuse defineerimine kursori asukohas näidatavaks suuruseks

def format_coord(x, y):

    abslat = np.abs(latitude-y)

    abslon= np.abs(longitude-x)

    c = np.maximum(abslon,abslat)

    latlon_idx = np.argmin(c)

    z = reff.flat[latlon_idx]

    return 'x=%1.4f, y=%1.4f, z=%1.4f' % (x, y, z)

ax.format_coord = format_coord

```

```
#joonise salvestamine pildifailina ning interaktiivse joonise näitamine  
plt.savefig('./Sreff.png')  
plt.show()
```

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Silver Põlgaste,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Aerosoolide mõju pilvedele MODIS ja SEVIRI satelliitinstrumentide andmete põhjal,

mille juhendaja on Velle Toll, PhD, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Silver Põlgaste

Tartu, 29. mai 2020. a.